

# 载人航天器关键电子产品综合环境应力试验

雷剑宇, 霍佳婧, 楚丽妍

(中国空间技术研究院 载人航天总体部, 北京 100094)

**摘要:** 载人航天器电子产品在轨经历多种环境应力的综合作用, 为提高载人航天器电子产品的可靠性, 针对其综合应力环境考核需要, 制定了载人航天器电子产品综合环境应力试验方案, 并设计了试验程序, 明确了各单项应力环境试验条件。经筛选, 9艘载人航天器共136台电子产品参加了综合环境应力试验。试验结果表明, 综合环境应力试验可以有效地暴露载人航天器电子产品设计和制造缺陷。

**关键词:** 载人航天器; 关键电子产品; 综合环境应力试验

**中图分类号:** V551; V216.57      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2012)05-0006-03

## Combined Environmental Test of Key Electronic Equipments of Manned Spacecraft

LEI Jian-yu, HUO Jia-jing, CHU Li-yan

(China Academy of Space Technology, Institute of Manned Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Electronic equipments of manned spacecraft subject to various environmental stress on orbit. To strength the reliability of key electronic equipment of manned spacecraft, a scheme of combined environmental test was established and test procedure was designed, which determined the environmental conditions of every single item. 136 units of key electronic equipments for 9 manned spacecrafts were selected to participate in the combined environmental tests. The results showed that combined environmental test can effectively expose defects of manned spacecraft electronic equipments design and manufacturing.

**Key words:** manned spacecraft; key electronic equipments; combined environmental test

综合环境应力试验是近20年发展起来的一种新试验技术, 其过程是根据产品经历的实际环境特点, 将综合环境应力(温度、湿度、振动等)与电应力同时施加到产品上, 以再现产品经受的综合应力环境效应, 有计划、强制性地把在设计、制造中引入产品的缺陷激发暴露为故障, 然后对故障进行分析并采

取纠正措施, 最终提高产品固有可靠性。

载人航天器电子产品经历的是一个复杂的环境, 受到多种环境应力的综合作用。为提高载人航天器关键电子产品的可靠性, 真实地模拟其经受的实际环境条件, 对其进行综合环境应力试验有非常现实的意义。设计合理的综合环境试验比单因素试

收稿日期: 2012-06-03

基金项目: 国家重大科技专项

作者简介: 雷剑宇(1982—), 男, 湖北崇阳人, 博士, 工程师, 从事载人航天器总体设计工作。

验更真实地模拟产品使用中遇到的环境或受到的影响,更易激发出单因素试验难以发现的故障,有利于故障的早期发现<sup>[1]</sup>。

## 1 综合环境应力试验方案

### 1.1 综合环境确定

载人航天器电子产品全寿命周期内需要经受运输、存储、总装、地面试验、测试、发射入轨以及在轨飞行多种环境。产品外部环境如温度、湿度、压力各阶段不同,动力学环境(振动、冲击)同样会发生变化。因此,电子产品在其寿命的各个阶段中面临的环境应力并不是单一的,而是多个环境应力的综合,其产生的失效和故障往往与多种环境因素共同作用有关。综合试验不仅可以暴露单因素环境作用产生的失效和故障,也可以暴露几个环境因素综合作用产生的失效和故障。

然而,工程实践中并不能将各种环境因素都综合在一个试验装置(如试验箱)内并加以很好地控制,同时也需要考虑成本、进度等因素,因此应选择电子产品最为敏感的应力环境进行综合考核。

在所有的环境因素中,电子产品对振动、温度和湿度最为敏感。据电子产品的失效原因统计:温度占43.3%,振动占28.7%,湿度占16%,这3种应力作用导致的失效占88%<sup>[1-2]</sup>。目前综合应力试验产品也实现了温度、湿度、振动环境的综合,而电应力可以通过外部供电产品调节供电电压实现。

综合考虑环境敏感性和试验可实施性,载人航天器选择温度、湿度、振动和电应力的综合环境对电子产品进行考核。

### 1.2 试验量级

载人航天器电子产品进行的综合环境应力试验不是破坏性试验,单项应力试验量级不超过鉴定级水平,要求产品能够承受综合环境考核。试验过程中,如产品出现故障即说明产品存在缺陷,需要进行故障分析并采取纠正措施。

### 1.3 试验对象

每艘载人航天器配套电子产品近百台,如全部

进行综合环境应力试验,成本和进度均不允许。因此遵循如下原则选择参试电子产品:

- 1) 关键的控制类产品,如姿态轨道控制器、中央处理单元等;
- 2) 新研发或有较大更改的重要电子产品,此类产品没有经过飞行试验,需要重点加强考核;
- 3) 关键飞行任务产品,例如交会对接任务相关的电子产品,关系到交会对接飞行任务成败,可靠性要求高。

基于上述原则,每艘载人航天器遴选出15台左右关键电子产品参加综合环境应力试验。由于在常规环境试验基础上加强考核,因此参试产品在参加综合环境应力试验前,应完成全部的单项环境试验,包括振动、热循环、老炼等试验项目。

### 1.4 试验装置

试验装置要求配置试验自动控制系统,实现试验程序数字化编制,设置温度、湿度等试验参数,自动记录试验数据,全程监视试验状态并诊断故障,具有报警及保护功能(过流/过行程/温度)。为节省试验成本和时间,要求试验装置能够同时支持两台以上的产品进行试验。

1) 温湿度控制能力要求。温度范围: -70~+160 ℃;相对湿度范围: 10%~98%;变温率:  $\geq 5$  ℃/min(产品本体)。

2) 振动控制能力要求。承载能力:  $\geq 200$  kg;频率范围: 5~2000 Hz;最大位移:  $\geq 50$  mm(P-P);最大加速度: 正弦 $>100g$ ,随机(有效值) $\geq 50g$ 。

## 2 试验程序设计

### 2.1 试验总时间

载人航天器关键电子产品可靠度指标要求达到0.995,置信度0.7,等效任务时间1 h。

电子产品可靠度随时间的变化近似服从指数分布,试验总时间为<sup>[3]</sup>:

$$t_{\text{平}} = -t_0 / \ln R \quad (1)$$

$$t = -t_{\text{平}} \cdot \ln(1 - \beta) \quad (2)$$

式中:  $t$  为产品总试验时间;  $R$  为可靠性指标;  $t_{\text{平}}$  为平均无故障工作时间;  $t_0$  为等效任务时间;  $\beta$  为置

信度。

根据式(1),(2),可得到总时间 $t$ 为240 h。据此设计每个试验循环为16 h,循环次数为15次。

### 2.2 温度应力设计

参照 Q/W 1223《航天器组件热试验技术要求》,将温度应力上限确定为70 ℃,下限为-35 ℃。同时,要求试验中高温工况时产品加电测试,考核产品高温环境下的工作性能。

温度变化速率对电子产品故障筛选效果影响大,应尽可能加快温度变化速率。GJB 1032《电子产品环境应力筛选方法》规定产品或部件筛选的温度变化速率不小于5 ℃/min,但其主要针对单项热冲击筛选试验。对于综合环境应力试验而言,由于参试产品热惯性影响,产品的实际温度变化速率远低于试验箱内的空气变温率,即使采用液氮降温方法,产品本身变温率也难以超过5 ℃/min,加之大多数电子产品热耗大,变温难度更大。因此,参照 Q/W 1223 确定试验中产品本体变温率为3~5 ℃/min(平均值),与热循环试验变温率要求相同。

### 2.3 湿度应力设计

载人航天器中,部分电子产品位于密封舱内,可能处于局部高湿环境;部分产品处于返回舱,返回后可能溅落大海。因此,结合试验台的能力,将相对湿度上限确定为95%,可充分考核产品承受高温高湿的能力。同时,试验过程中由高温转入低温工况后,若产品结构密封不严,产品内部可能会吸潮受损发生异常;产品外部接插件等部位可能结露,若设计和制造存在缺陷,则可能发生短路等异常。

### 2.4 振动应力设计

振动应力主要模拟火箭发射段的力学环境。相比于正弦振动,电子产品对随机振动环境更敏感。参试的电子产品分布于载人航天器中不同舱段,上升段承受的随机振动环境条件不同。为加强考核,选用最大值作为振动应力条件,对产品施加的振动应力方向要求与火箭射向一致,总量级加速度均方根值( $g_{rms}$ )要求达到4.55g,功率谱密度要求如图1所示。

每个试验循环中,要求在高温段和低温段各施

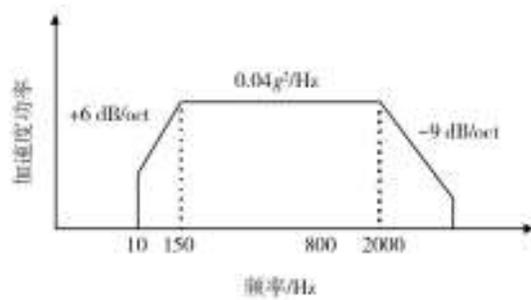


图1 综合环境应力试验随机振动谱

Fig. 1 The random vibration spectrum of combined environmental test

加一次随机振动,每次持续60 s,并在振动过程中对产品保持性能监测。

### 2.5 电应力设计

载人航天器为电子产品提供27 V供电,电压范围为24~30 V。综合环境应力试验中,要求每个循环在上、下限电压工作时间均不低于30 min,考核电压上限和下限条件下产品是否能正常工作。加电过程中,保持对产品性能检测。

在不同的飞行阶段,产品需要根据任务要求关机或启动,因此每个循环高低温段设计3次关机、启动,考核产品断电再启动能力。

综合上述分析,综合环境试验中单次循环试验剖面如图2所示。

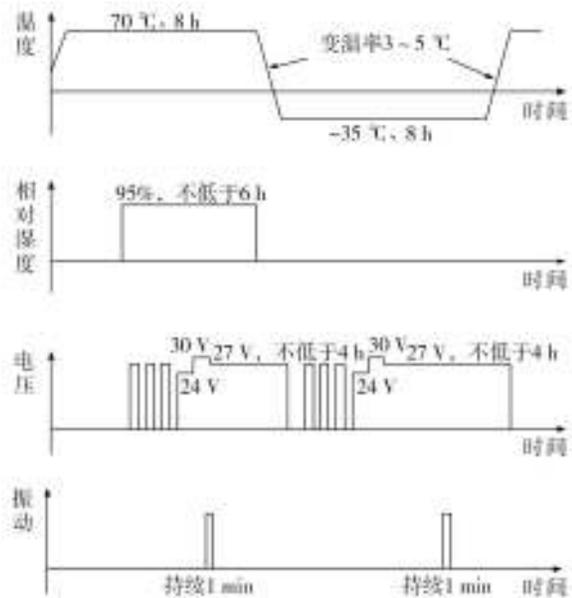


图2 综合环境应力试验剖面

Fig. 2 The profile chart of combined environmental test

## 4 结论

根据 GB/T 7031—2005 建立履带车辆特殊路面的路面谱模型,确立了运用负重轮轮轴加速度的振动变化来分析测试履带车辆路面谱的基本原理,为此设计了一套专门的测试系统并进行不同特殊路面的实车测试,利用 Matlab 分析软件生成位移功率谱密度,拟合出标准路面谱并计算出特征值。经多次路面测试,试验结果给出的特征值能够正确反映特殊路面的变化规律,并可作为仿真路面激励的基本依据。

## 参考文献:

- [1] GB/T 7031—2005, 机械振动 道路路面谱测量数据报告[S].
- [2] 丁法乾. 履带式装甲车辆悬挂系统动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [3] 明波,杨洁,贾进峰. 基于三维路面谱仿真履带车辆振动系统的动态模拟[J]. 装备环境工程,2011,8(2):85—88.
- [4] 贾进峰,张进秋,张建,等. 基于路面谱随机激励的履带车辆舒适性仿真研究[J]. 系统仿真学报,2012,24(6):1350—1354.
- [5] 邢志,吕建刚,李猛,等. 履带式车辆路面反应谱测试的可行性研究[J]. 探测与控制学报,2006,28(1):32—36.

(上接第8页)

## 3 试验结果分析

载人航天工程一期和二期9艘各型载人航天器共选择136台电子产品开展综合环境应力试验,其中共有17台产品在综合环境应力试验中出现各类故障,占到参试产品总数的12.5%。其中,典型故障包括:

1) 印制电路板制造不合格。综合环境应力试验中,多台产品由于印制电路板制造不合理,存在虚焊、虚接或元器件管脚焊接不到位等问题,在温度和随机振动应力环境综合作用下制造缺陷得以暴露。

2) 材料选用不当。通过试验发现,某些产品选用材料不当,如硅橡胶类非金属材料,受热胀冷缩影响较大。在交变环境中材料产生附加应力或变形,可能导致其包裹的导线断裂或与其他元器件搭接,从而引发产品故障。

3) 交变温湿环境不适应。在交变的高温高湿环境,某些产品表面涂层不能耐受,出现大面积脱落现象,需要改进涂层加工工艺。某些产品接插件设计存在缺陷,低温结露后产生短接,导致产品性能出现异常。

由于综合环境应力试验是在产品完成例行的鉴

定级环境试验后进行的,通过此项试验,进一步发现了产品在设计、加工等方面的缺陷,避免了这些存在缺陷的产品参加飞行试验任务,并通过后续纠正措施提高了产品的可靠性。

## 4 结语

载人航天器选择关键电子产品参加温度、湿度、随机振动以及电应力综合环境应力试验,并根据任务特点和考核需要设计试验程序。

载人航天工程一期和二期,通过综合环境应力试验,能够发现多台关键电子产品常规环境试验项目难以暴露的缺陷,据此改进设计以及制造工艺,提高了产品的可靠性,有力地保障了飞行试验任务的成功。

## 参考文献:

- [1] 林震,张爱民. 综合环境应力试验初探[J]. 环境技术,2002(3):1—4.
- [2] 张伟. 温、湿、振三综合环境试验技术的应用[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2004(6):38—41.
- [3] 陈万创. 捷联惯性测量装置的综合环境应力可靠性试验[J]. 上海航天,2004(1):58—61.